

# НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА КОВКИ ПРИ ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ

## SCIENTIFIC BASIS OF EFFICIENCY OF FORGING PROCESS UNDER ALTERNATING DEFORMATION

## ALTERNATING

А.А. Богатов ([omd@urfu.ru](mailto:omd@urfu.ru)), Д.Ш. Нухов ([danis\\_nuchov@mail.ru](mailto:danis_nuchov@mail.ru))  
ФГАО ВПО «Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина», г.  
Екатеринбург, 620002, Российская Федерация

### Abstract

*The paper considers the idea of alternating deformation under the forging of cast ingots and determines the reasonable form of forging tools. The use of the new tool provides working out of metal structure in first passes by additional alternating deformation without significantly changing the shape of the cross section of the workpiece. The results of the analysis of the strain state of metal under forging by ribbed and flattened hammer head are present. The ways of forging process control to improve the homogeneity of the strain state of ingot, stimulating of polygonized substructure formation during reduction and ultrafine structure after metadynamic recrystallization during pause are found.*

### Введение

Важнейшей проблемой, стоящей перед отечественным машиностроением, является улучшение макро- и микроструктуры, повышение уровня механических свойств и эксплуатационной надежности металлопродукции. Применение непрерывно-литой заготовки (НЛЗ) по сравнению с горячекатаной заготовкой уменьшает себестоимость продукции, однако, слитки, получаемые на МНЛЗ, имеют грубую литую структуру и внутренние дефекты (трещины и пористость) [1]. Известна идея деформации слитка без изменения формы поперечного сечения способом равноканального прессования [2], а также интенсификации знакопеременной деформации по всему объему деформируемого металла [3-11]. Знакопеременная деформация способствует увеличению накопленной деформации без изменения формы поперечного сечения заготовки, стимулирует образование полигонизованной субзеренной структуры и повышению дисперсности зеренной структуры. Авторами работы поставлена задача изучить деформированное состояние при ковке непрерывно-литой заготовки, поочередно – в ребристых и гладких бойках таким образом, чтобы сохранилась первоначальная форма поперечного сечения, найти рациональные размеры очага деформации, обеспечивающие удовлетворительное заполнение гравюры штампа и проработку структуры на все сечение поковки при минимальных обжатиях.

### 1. МКЭ - моделирование процессаковки заготовок в ребристых и гладких бойках в условиях плоской деформации

В работе представлены результаты анализа деформированного состояния металла в бойках с ребристой поверхностью, (рис.1.а), а также в

гладких бойках – на втором этапе деформирования (рис.1б). Длина поковки и бойков принята неограниченно большой, поэтому ее деформация в направлении длины отсутствует, выполняется условие плоской деформации. Для определения рациональной геометрии бойка варьировали параметрами очага деформации –  $e/r$ ,  $r/h$ ,  $\Delta h/h$  на трех уровнях, здесь  $r$  – радиус окружности гравюры бойка;  $e$  – расстояние между центрами окружностей соседних элементов гравюры (углубление и выступ);  $h$  – высота заготовки;  $\Delta h$  – обжатие по высоте заготовки. Заполнение металлом элементов гравюры бойка количественно оценивали через коэффициент заполнения –  $\delta = \frac{h_{\text{ме}}}{h_{\text{угл}}} * 100\%$ , где  $h_{\text{ме}}$  – высота элемента поковки, заполнившего гравюру бойка;  $h_{\text{угл}} = r - 0,5e$  – высота углубления бойка. Матрица планирования эксперимента представлена в табл.1. С целью упрощения процедуры твердотельного моделирования инструмента, варьирование параметра  $r/h$  осуществляется изменением высоты заготовки: 250 мм, 300 мм, 350 мм, а значение радиуса осталось неизменным ( $r=50$  мм). Обжатие заготовки по высоте  $(\Delta h/h)*100\%$  было принято: 10%, 14% и 20%. Для оценки неравномерности деформации по высоте слитка выполнен расчет накопленной степени деформации частицами  $\epsilon_i$  в очаге деформации по шести траекториям в сечении углубления на бойке (сечение I): P1 – траектория частицы на наружной поверхности заготовки ( $y=h/2$ ); P6 – траектория частицы по плоскости симметрии ( $y=0$ ) и по шести траекториям в сечении выступа бойка (сечение II): P7 – траектория частицы на наружной поверхности заготовки ( $y=h/2$ ); P12 – траектория частицы по плоскости симметрии ( $y=0$ ) (см. рис.1).

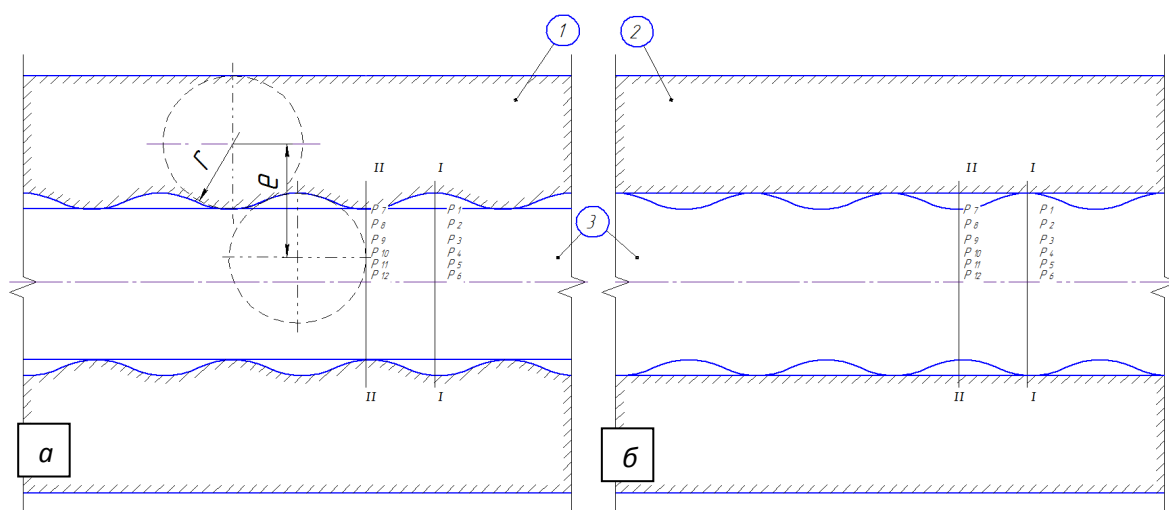


Рис. 1. – Деформирование заготовки в бойках с ребристой поверхностью на первом этапе обжатия (а) и плоскими бойками на втором этапе (б):

1 и 2 – рельефный и плоский боек; 3 – заготовка;

$r$  – радиус окружности гравюры бойка;  $e$  – расстояние между центрами окружностей соседних гравюр (углубление и выступ) бойка;

P1-P12 траектории частиц металла в сечениях (I) и (II)

Таблица 1

Матрица полного факторного эксперимента  $3^3$

Расчетные параметры	Параметры очага деформации																										
	e/r=0									e/r=1									e/r=1,75								
	r/h=1/5			r/h=1/6			r/h=1/7			r/h=1/5			r/h=1/6			r/h=1/7			r/h=1/5			r/h=1/6			r/h=1/7		
	Δh/h			Δh/h			Δh/h			Δh/h			Δh/h			Δh/h			Δh/h			Δh/h			Δh/h		
	0,1	0,14	0,2	0,1	0,14	0,2	0,1	0,14	0,2	0,1	0,14	0,2	0,1	0,14	0,2	0,1	0,14	0,2	0,1	0,14	0,2	0,1	0,14	0,2	0,1	0,14	0,2
δ	28,7	43,4	48,6	31	44,4	51,6	32,3	45,5	50,6	44,5	68,4	89,1	49,3	72,5	90,1	56,1	76,4	94,6	100	100	100	100	100	100	100	100	100
ε <sub>6</sub>	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,005	0,030	0,050	0,05	0,001	0,0	0,03	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,05	0,04	0,06	0,16	0,025	0,06	0,128	0,020	0,065	0,21
ε <sub>Σ</sub> <sup>6</sup>	0,162	0,222	0,23	0,235	0,214	0,22	0,180	0,210	0,24	0,204	0,3	0,36	0,18	0,27	0,34	0,15	0,29	0,37	0,20	0,29	0,4	0,171	0,25	0,375	0,176	0,232	0,46
ε <sub>12</sub>	0,084	0,012	0,16	0,091	0,102	0,181	0,100	0,100	0,17	0,071	0,0	0,17	0,07	0,10	0,22	0,07	0,01	0,25	0,18	0,23	0,43	0,123	0,22	0,330	0,108	0,157	0,30
ε <sub>Σ</sub> <sup>12</sup>	0,208	0,283	0,37	0,311	0,255	0,299	0,100	0,100	0,17	0,197	0,2	0,38	0,18	0,27	0,34	0,22	0,47	0,38	0,20	0,40	0,40	0,203	0,32	0,408	0,214	0,315	0,53

Среднее значение накопленной степени деформации по высоте определяется по формуле:  $\varepsilon_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i$ ,  $i$  – номер траектории частицы,  $n = 5,5$ . Неравномерность деформации по высоте слитка оценивается с помощью коэффициента вариации  $S/\varepsilon_{cp}$ , где  $S = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \varepsilon_{cp})^2 \right]^{1/2}$  – среднее квадратичное отклонение. Накопленная степень деформации для конкретной частицы  $\varepsilon_i$  определяется из решения задачи с помощью программы Deform для плоско-деформированного состояния в изотермических условиях. Показатель трения (по Зибелю) между бойками и заготовкой принят равным  $\psi = 0,6$ . Для достоверности результатов расчетов, минимальный размер элемента был принят равным 3 мм при высоте заготовки от 250 до 350 мм.

Результаты расчета формоизменения и накопленной степени деформации при обжатии в ребристых бойках (рис.1а) с отношением  $e/r = 0$

( $e=0$ ,  $r=50$  мм) показали, что заполнение металла в полость впадины штампа во всем диапазоне значений  $r/h$ ,  $\Delta h/h$  не обеспечивается (коэффициент заполнения  $\delta$  изменяется в пределах 28,7÷60,6%. (см. табл.1)). Кроме того, при всех вариантах обжатия (10%, 14% и 20%) для всех значений толщины заготовки  $h$  (250 мм, 300 мм и 350 мм) деформация практически не проникает в осевую зону заготовки, а значение накопленной степени деформации в центральной зоне очага деформации составляло  $\varepsilon_6 = 0,001 \div 0,05$  (сечение I) и  $\varepsilon_{12} = 0,084 \div 0,181$  (сечение II). После обжатия плоскими бойками на втором этапе суммарная деформация  $\varepsilon_{\Sigma}^6$  и  $\varepsilon_{\Sigma}^{12}$  не превышают 0,24 и 0,37 соответственно. Результаты решения задач при обжатии заготовки в бойках с отношением  $e/r = 1$  ( $e=50$  мм,  $r=50$  мм) показали, что коэффициент заполнения увеличивается и находится в пределах 44,5÷94,6% (см. табл.1), а накопленная в осевой зоне деформация составляет –  $\varepsilon_6 = 0,001 \div 0,055$  и

$\varepsilon_{12}=0,071\div0,256$ . Суммарные деформации после обжатия ребристыми и плоскими бойками –  $\varepsilon_{\Sigma}^6$  и  $\varepsilon_{\Sigma}^{12}$  увеличиваются по сравнению с предыдущим вариантом и составляют 0,375 и 0,479 соответственно.

Иная картина наблюдается при деформировании заготовки в ребристых бойках с отношением  $e/r = 1,75$  ( $e = 87,5$  мм,  $r = 50$  мм). Полное заполнение гравюры бойка происходит при минимальном обжатии по толщине – 10% (рис.2).

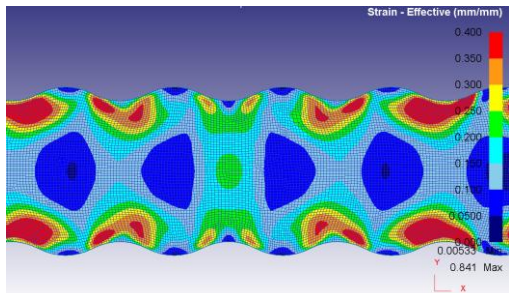


Рис. 2. – Распределение накопленной степени деформации (Strain-Effective) в очаге деформации в ребристых бойках с  $e/r = 1,75$  при  $r/h = 1/5$  и  $*100\% = 10\%$

На рис. 3 и рис.4. представлены графики, полученные по результатам исследованияковки заготовки в ребристых бойках с отношением  $e/r =$

1,75 при обжатии  $\Delta h/h * 100\% = 10\%$ . На рис.3.а,б показан характер распределения накопленной степени деформации после обжатия ребристыми (на первом этапе – рис.3а) и плоскими бойками (на втором этапе – рис.3б) в сечении I, а на рис.3в,г – в сечении II. Из рис.3. видно, что в точках P1 и P7 деформация незначительна ( $\varepsilon = 0,03\div0,12$ ). В приконтактных слоях деформация минимальна, т.к. имеются зоны затрудненной деформации (зоны прилипания), протяженность которых по мере продвижения в глубь металла уменьшаются; в начале пластической деформации возникает свободная поверхность – поверхность не находящейся под рабочим инструментом. По графикам можно заметить, что распределения  $\varepsilon$  как в сечении I, так и в сечении II неравномерно, но при этом, деформация проникает в центральную зону заготовки. Результаты расчета  $\varepsilon$ , представленные на графиках (см. рис.3), позволяют определить оптимальные размеры очага деформации (параметр  $r/h$ ), с точки зрения проникновения деформации при минимальном обжатии по высоте 10 %. Относительная степень деформации  $\varepsilon$  наибольшая при  $r/h = 1/5$  и достигает значений в центральной зоне заготовки – 0,204 (сечение I) и 0,214 (сечение II), после обжатия ребристыми и плоскими бойками.

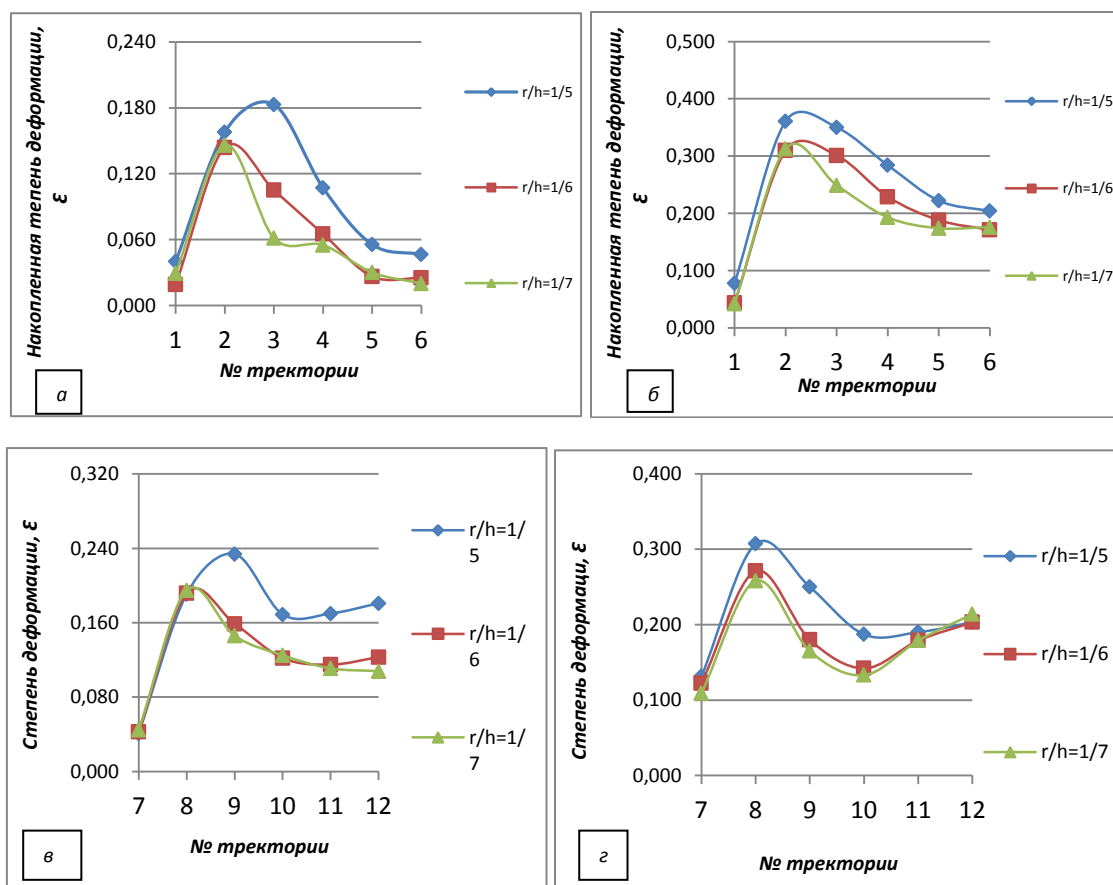


Рис.3. – Распределение степени деформации  $\varepsilon$  после первого (а) и второго этапа (б) деформации в сечении I (углубления бойка) и после первого (в) и второго этапа (г) деформации в сечении II (выступа бойка)

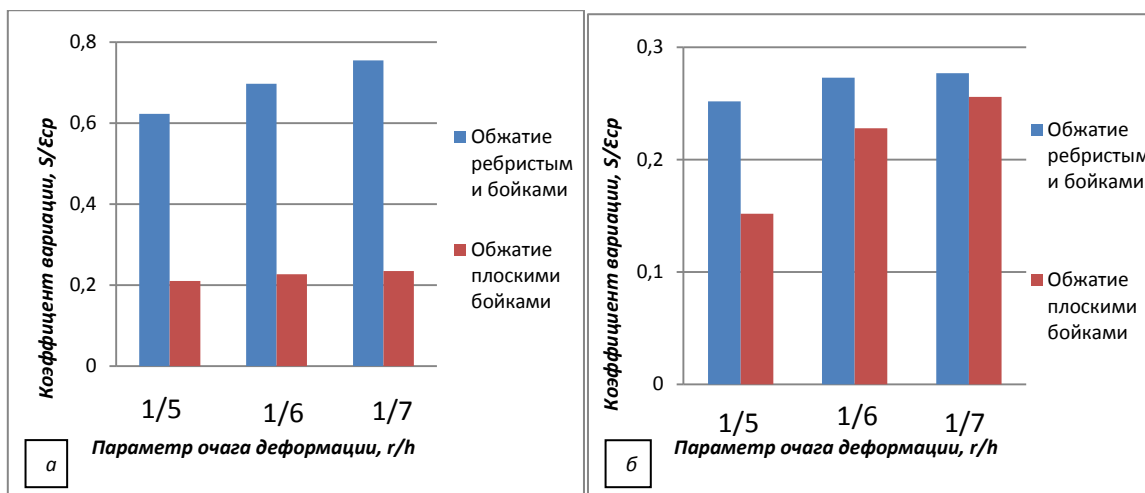


Рис.4. – Коэффициенты вариации  $S/\varepsilon_{cp}$  в зависимости от параметра очага деформации  $r/h$  в сечениях I (а) и II (б)

На рис.4 показано распределение коэффициента вариации  $S/\varepsilon_{cp}$  в сечениях I (рис.4а) и II (рис.4б) в зависимости от параметра очага деформации  $r/h$  после обжатия на первом и втором этапах ребристыми и плоскими бойками. Наименьшее значение  $S/\varepsilon_{cp}$  в очаге деформации с параметром  $r/h = 1/5$  –  $S/\varepsilon_{cp} = 0,62$  и  $0,20$  – в сечении I после обжатия ребристыми и плоскими бойками соответственно, и  $S/\varepsilon_{cp} = 0,25$  и  $0,15$  – в сечении II.

## 2. Определение показателя напряженного состояния в ребристых бойках в условиях знакопеременной деформации

Знакопеременная деформация характеризуется количеством этапов  $n$  и амплитудой  $\varepsilon_i$  на этапе,

причем на каждом этапе деформация является либо монотонной, либо квазимонотонной и отвечает условиям:  $\omega_k = 0$ ; либо  $\text{sign} \omega_k = \text{const}$ . Здесь  $\omega_k$  – компоненты антисимметричного тензора скорости жесткого вращения материальной частицы в сопутствующей системе координат, связанной с базисом собственных векторов тензора скоростей деформации [3,4]. Применение инструмента с ребристой поверхностью, с углублениями и впадинами гравюры, позволяет получить обжатую заготовку с рифленой поверхностью, и дает возможность на следующем этапе обжатия плоскими бойками совершить знакопеременную деформацию при выравнивании поверхности поковки. (рис.5).

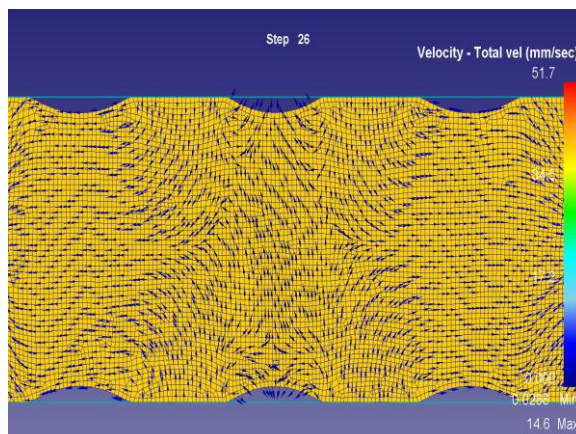
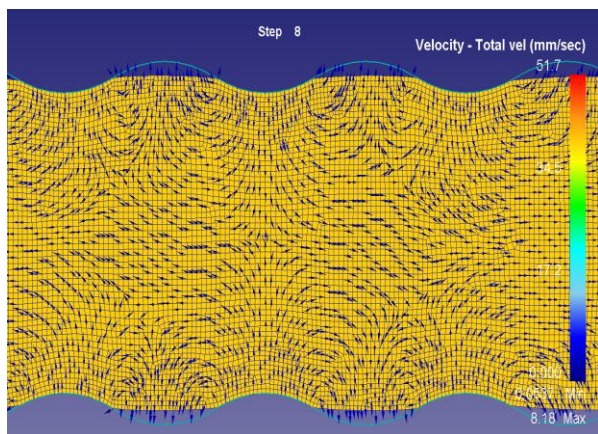


Рис. 5. – Направление суммарной скорости движения частиц металла (Velocity – Totalvel) при обжатии ребристыми (а) и плоскими бойками (б)

При плоской деформации интенсивность касательных напряжений равняется максимальному касательному напряжению, равному пределу текучести на сдвиг:  $T = \tau_{\max} = \tau_s$ , а условия идеальной пластичности имеет вид:  $\sigma_1 - \sigma_3 = 2\tau_s$ , где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  – главные нормальные напряжения. Главное нормальное напряжение, перпендикулярное плоскости течения, равно среднему нормальному напряжению:  $\sigma_2 = \sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$  [3]. Учитывая граничные условия для плоской

деформации при ковке слитков:  $\sigma_{nn} = \sigma_1$ ;  $\sigma_{\tau\tau} = \sigma_3$  и  $\sigma_{zz} = \sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_{\tau\tau} + \sigma_{nn})$ , где  $\sigma_{nn}$  и  $\sigma_{\tau\tau}$  – нормальные напряжения (рис.6). На свободной поверхности (поз.1, рис.6):  $\sigma_{nn} = 0$ , значит  $\sigma_{\tau\tau} = -2\tau_s$ , а  $\sigma_{zz} = -\tau_s$ , тогда напряженное состояние на свободной поверхности  $\frac{\sigma}{T} = -1$  ( $T = \tau_s$  – условие идеальной пластичности). На поверхности контакта (поз.2, рис.6):  $\sigma_{\tau\tau} = 0$ ,  $\sigma_{nn} = -2\tau_s$ , следовательно  $-\frac{\sigma}{T} = -1$ . При продвижении вглубь металла (ниже



линии)  $ab$  напряженное состояние  $\frac{\sigma}{T} \leq -1$ , так как нормальные напряжения  $\sigma_{nn}$  и  $\sigma_{\tau\tau}$  уменьшаются и зависят от условий трения.

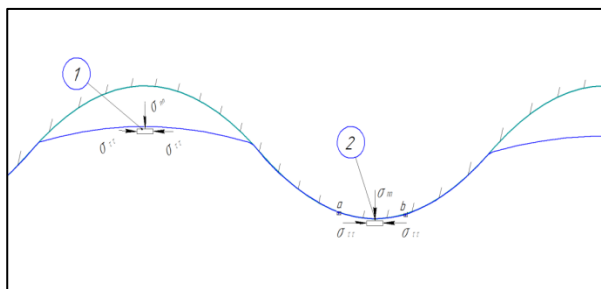


Рис.6. – Действие напряжений на свободной и контактной поверхностях заготовки:

1 – свободная поверхность; 2 – контактная поверхность;

$\sigma_{nn}, \sigma_{\tau\tau}$  – нормальные напряжения

### Выводы

Показано, что актуальной проблемой развития процессов обработки металлов давлением непрерывно-литых слитков является разработка нового способаковки, обеспечивающего деформационную проработку без изменения формы поперечного сечения и знакопеременный характер деформации. Полученные результаты анализа формоизменения и деформированного состояния металла при обжатии в два этапа (в ребристых, а затем в гладких бойках) позволили найти оптимальную форму ковочного инструмента с точки зрения заполнения металла гравюры штампа, а также проникновения деформации по всему сечению литой заготовки. При обжатии заготовки бойками с  $e/r = 1,75$  ( $e=175$  мм,  $r=100$  мм) металл полностью заполняет гравюру бойка (коэффициент заполнения  $\delta = 100\%$ ) при минимальном обжатии по толщине заготовки 10%. Обеспечивается проникновение деформации к осевой зоне металла в очаге деформации при обжатии 10% – накопленная степень деформации в осевой зоне заготовке в сечении углубления бойка  $\varepsilon_6 = 0,02 \div 0,047$  – на первом этапе обжатия ребристыми бойками и  $0,171 \div 0,204$  – на втором этапе обжатия плоскими бойками, а в сечении выступа бойка  $\varepsilon_{12} = 0,123 \div 0,181$  – на первом этапе обжатия ребристыми бойками и  $0,203 \div 0,214$  – на втором этапе обжатия плоскими бойками. При выравнивании заготовки плоскими бойками на втором этапе обжатия минимальные коэффициенты вариации  $S/\varepsilon_{ср} = 0,2$  и  $0,15$  для сечения I и II соответственно, были получены при использовании заготовки

отношением  $r/h = 1/5$  ( $r=50$  мм,  $h=250$  мм), обжатой на 10 % ребристыми бойками на предыдущем этапе деформирования.

### Список литературы

1. Логунова А.С., Парсункин Б.Н. Определение областей непрерывно-литой заготовки с наибольшей вероятностью нарушения сплошности металла. // Вестник уральского государственного технического университета – УПИ. – 2004. – Том 1. – С. 95-98.
2. Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И. и др. Процессы пластического структурообразования. Минск: Наука и техника. - 1994. - 232 с.
3. Богатов А.А. Механические свойства и модели разрушения металла. Учебное пособие. Екатеринбург: УГТУ-УПИ. 2002. – 328 с.
4. Богатов А.А., Мижирицкий И.О., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. – М.: Металлургия. -1984. – 144 с.
5. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Учебник. Екатеринбург: УГТУ-УПИ. 2001. – 835 с.
6. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением. А.Н.Леванов, В.Л. Колмогоров, С.П. Буркин и др. М.: Металлургия, 1976. 416 с.
7. Потапов И. Н., Полухин П. И. Технология винтовой прокатки / М.: Металлургия, 1990. – 344с.
8. Панов Е.И., Эскин Г.И. Влияние поперечно-винтовой прокатки на структуру и свойства заэвтектических силуминов // Металловедение и термическая обработка металлов. МиТОМ. -2004. - №9. С.7-13.
9. Овчинников Д.В., Богатов А.А., Ерпалов М.В. Разработка и внедрение технологии производства высококачественных насосно-компрессорных труб из непрерывно-литой заготовки/ Черные металлы: 2012, март, с.18-21.
10. Валиев Р.З. Создание наноструктурных металлов и сплавов с уникальными свойствами, используя интенсивные пластические деформации. Российские нанотехнологии. 2006 Т 1-2. - С. 208.
11. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
12. Найзабеков А.Б., Ашкеев Ж.А., Лежнев С.Н., Толеуова А.Р. Исследование процесса деформирования заготовки равноканальной ступенчатой матрице./ Изв. вузов. Черная металлургия. 2005. №2. - С. 16-18.